

# Забойный теплогенератор для месторождений высоковязких нефтей и природного битума

**А.И. Щёлоков**

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой  
[pt@samgtu.ru](mailto:pt@samgtu.ru)

**С.Ю. Коротин**

аспирант  
[arro116@mail.ru](mailto:arro116@mail.ru)

ФГБОУ ВО «СамГТУ», Самара, Россия

**Обозначены некоторые проблемы и возможные пути их решения при создании забойного теплогенератора для парогазотепловой обработки пластов высоковязких нефтей и природных битумов, работающего на газовом топливе (попутном или природном газе).**

## Материалы и методы

Изучение опыта разработки тяжелой нефти. Вывод расчётных закономерностей формирования парагаза в забойном теплогенераторе. Испытания лабораторной модели.

## Ключевые слова

забойный теплогенератор, высоковязкая нефть, парагазовая смесь

Мировые запасы нефти, извлекаемой традиционными способами, на сегодня оцениваются в 162 млрд т [1], из них в России — 14 млрд т [2]. Учитывая среднегодовую добычу российской нефти на уровне 520–530 млн т [2], проблема истощения недр с каждым годом становится актуальнее. В связи с этим в настоящее время значительное внимание нефтедобывающих предприятий сосредоточено на разработке месторождений такого углеводородного сырья, как высоковязкие нефти (ВВН) и природные битумы (ПБ). Известно, что запасы данных углеводородов в мире более чем в 5 раз превышают запасы традиционной нефти [1]. Однако их разработка требует значительных дополнительных затрат, применения специальных технологий и сложного, дорогостоящего оборудования. В силу указанных причин, большинство разрабатываемых месторождений ВВН и ПБ в мире эксплуатируются в опытно-промышленном порядке. Нефтяные компании рассматривают такого рода месторождения, в первую очередь, как источник сырья на перспективу, исследуя на эксплуатируемых участках различные технологии и образцы оборудования и выбирая те, которые позволят в последующем, при необходимости перехода к масштабному освоению такого рода месторождений, получить наибольший экономический эффект.

Парогазотепловое воздействие на продуктивный пласт в настоящее время считается одним из наиболее эффективных способов снижения вязкости нефти. Совместное нагнетание водяного пара и газообразных продуктов сгорания топлива оказывает положительное влияние на коэффициент вытеснения нефти; закачка растворимого в углеводородах газа (оксида или диоксида углерода) с паром ведет к дополнительному снижению вязкости нефти, увеличению ее объема и проявлению режима растворенного газа. Сравнительная эффективность указанного способа может быть проиллюстрирована следующими результатами промышленного применения паротеплового и парогазотеплового методов на различных месторождениях России [3]: на терригенном типе коллектора парагазовый фактор (затраты пара или парагаза в расчете на 1 т добытой нефти) при использовании пара составил 6,5, а парагаза — 2,0. На карбонатном типе коллектора аналогичные показатели равны 2,1 и 1,2. Следовательно, эффективность парогазотеплового метода в 2–3 раза выше паротеплового.

Ввиду значительных тепловых потерь при транспорте парагаза по скважине, экономически более оправдано вырабатывать данный теплоноситель непосредственно в нефтеносном пласте на забое скважины. В разное время были разработаны и испытаны образцы забойных теплогенераторов нескольких схем, работающих как на трёх исходных компонентах (воздух, топливо, вода), так и на двух: монотопливе, из состава которого при разложении на забое выделяется как топливо, так и окислитель и

балластировочной воде, которая может подаваться одним потоком с монотопливом [4, 5]. Основными проблемами при создании забойных парагазогенераторов являются:

- обеспечение требуемого уровня надежности, а также живучести установки при аварийной разгерметизации трубопроводов;
- компактность устройства за счёт интенсификации процесса горения и парообразования;
- устойчивый розжиг газогорелочного устройства;
- использование, по возможности, местных топливно-энергетических ресурсов.

Использование в качестве топлива попутного газа как наиболее дешёвого и доступно на месторождениях топлива, предполагает трехпоточную подачу компонентов: в теплогенераторе сначала сжигается газо-воздушная смесь, затем в продукты сгорания впрыскивается вода. При этом, исходя из требований к компактности устройства, необходимо обеспечить эффективное охлаждение стенок камеры сгорания, а распыл воды должен быть максимально тонким, ввиду малого времени на перемешивание капель воды с продуктами сгорания. Неиспарившиеся капли вызывают эрозию, как тракта агрегата, так и перфорированной трубы, через которую ведется закачка теплоносителя в пласт.

Возможная принципиальная схема забойного теплогенератора на газовом углеводородном топливе показана на рис. 1. Теплогенератор, газовое топливо к которому подаётся по колонне насосно-компрессорных труб 1, состоит из корпуса 2, образованного наружной втулкой и внутренней частями, между которыми располагается спиральный водяной канал 3. Теплогенератор содержит: газогорелочное устройство 4 с электромагнитным газовым клапаном и электроискровым запальным устройством, размещенное в торце камеры сгорания 5, камеру сгорания, имеющую форму цилиндра, переходящего в усеченный конус и камеру смешения 6, состоящую из цилиндрической части малого сечения, конической части и цилиндрической части большого сечения. В цилиндрической части малого сечения камеры смешения расположены сопла для впрыска воды 7. Узел подачи топлива в горелку выполнен в виде стыковочной головки 8, служащей также для ориентации топливоподающей колонны при спуске. Вода подаётся по спиральному каналу, образованному проточкой на наружной поверхности внутренней части корпуса и втулкой. Проточка имеет начальный и конечный тупиковый участок: непосредственно за начальным участком располагаются трубки от водяного присоединительного штуцера, стыкуемого с водоподающей насосно-компрессорной колонной 9. Данный способ подачи воды позволяет резко интенсифицировать теплообмен, ввиду чего вода, нагретая до значительной температуры, впрыскивается через сопла, и, мелко распыляясь, практически мгновенно испаряется. Воздух для сжигания топлива подаётся по кольцевому пространству между водоподающей колонной НКТ и

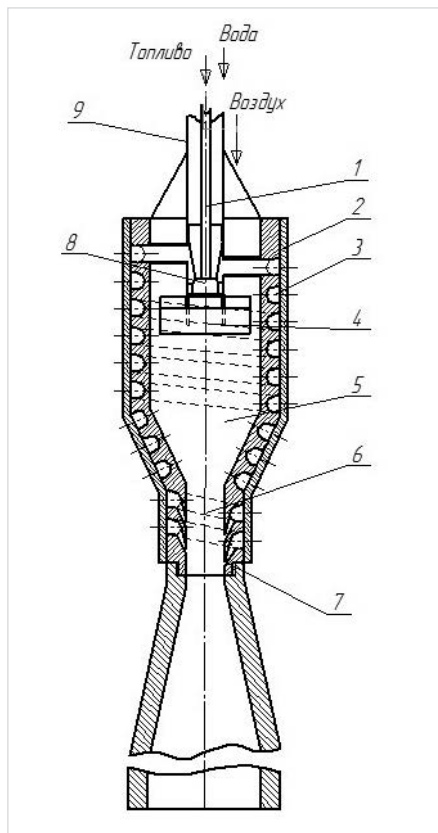


Рис. 1 — Схема забойного теплогенератора на газовом топливе

обсадной колонной. Конический участок камеры смешения стыкуется с цилиндрическим малого сечения посредством резьбового соединения. Таким образом, теплогенератор имеет разборную конструкцию, позволяющую выполнять механическую очистку всех внутренних полостей от загрязнений.

Теплогенератор вводится в работу следующим образом: открывается задвижка линии подачи воды на поверхности, в конической части теплогенератора происходит мелкое разбрызгивание воды и образование воздушно-капельной смеси (тумана), за счёт чего протекающий транзитом воздух на «холодной» установке после камеры сгорания балластируется микрокаплями воды для самотушения хлопка при загазовывании призабойной зоны в случае несвоевременной инициации горения; затем производится продувка скважины воздухом и открытие газового клапана на минимальный расход, после чего — розжиг газогорелочного устройства. После поступления сигнала с фотодатчика, горелка выводится на рабочий режим наращиванием подачи воздуха и газа, а в камере смешения начинается активное испарение микрокапель воды при контакте с продуктами сгорания.

Как сказано выше, подача компонентов на забой осуществляется тремя потоками, поэтому важно исключить аварийную ситуацию (взрыв, пожар) при разгерметизации топливоподающей колонны насосно-компрессорных труб. Ввиду этого, наиболее безопасной и надёжной видится следующая схема: вначале на забой на колонне насосно-компрессорных труб большого диаметра спускается сам агрегат и фиксируется на забое при помощи термостойкого пакера, затем в первую колонну НКТ погружается соосно вторая колонна, меньшего диаметра, на конце которой находится стыковочная головка со встроенным регулирующим клапаном. Колонна НКТ малого диаметра служит для подачи газового топлива, кольцевое пространство между ее стенкой и стенкой колонны большого диаметра — для подачи воды, а пространство между колонной большого диаметра и обсадной колонной — для подачи воздуха. Таким образом исключается прямой контакт воздуха и газового топлива в случае утечек в любом из каналов подачи исходных компонентов парагаза.

В процессе работы над теплогенератором, на основе [6] была разработана математическая модель образования гомогенной газопаровой смеси (парагаза) с требуемыми параметрами, учитывающая размеры рабочих камер и расходы компонентов.

Лабораторная модель установки [7] прошла стендовые испытания (рис. 2, 3) на кафедре промышленной теплоэнергетики Самарского государственного технического университета, доказав работоспособность и эффективность и подтвердив расчётные закономерности формирования газопаровой смеси. Мощность газогорелочного устройства составляла 4 кВт; наибольший расход воды  $G=0,01181$  кг/с. Ввиду особенностей работы тепловизионного оборудования, на инфракрасных снимках отображается температура только твердых тел, поэтому для определения температурного поля парагаза был использован сетчатый экран из нержавеющей стали. Экран был разбит на контрольные сечения с расстоянием от форсунки  $X=0,23; 0,27; 0,31$  и  $0,35$  м, по которым производились замеры при помощи цифрового термометра. Было проведено четыре серии опытов, в ходе которых были определены, соответственно:

1. Величина повышения температуры смеси в контрольных сечениях потока при повышении (от 10 до 60 °С, с шагом 10 °С) температуры впрыскиваемой воды; так, в первом контрольном сечении (расстояние от точки впрыска = 0,23 м)  $T_{\min}=142,843^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\max}=221,486^{\circ}\text{C}$ .
2. Расход воды при фиксированной мощности горелки, при котором в первом контрольном сечении остаётся неиспаряемый излишек воды.
3. Тепловая мощность горелки, необходимая для полного испарения воды — поверочный опыт; по результатам данного опыта и опыта №2 было выявлено, что при  $G=0,00128$  кг/с мощность горелки не должна быть менее 3,2 кВт.
4. Смещение устройства впрыска от исходного положения практически не оказывает влияния на процесс формирования парагаза.

На конструкцию лабораторной модели был получен патент РФ [7], заявка на изобретение №2016114923 на отображённую в статье схему теплогенератора находится в стадии рассмотрения.

#### Итоги

Предложена конструкция забойного теплогенератора на газовом топливе (попутном или природном газе), соответствующего требованиям топливно-энергетической эффективности и пассивной безопасности. Разработана методика расчёта рабочего процесса и определения геометрических параметров агрегата для опытно-промышленной установки,

подтвержденная результатами испытаний лабораторной модели.

В настоящее время ведется проработка опытно-промышленного образца забойного теплогенератора с учетом экспериментальных данных, полученных при испытаниях лабораторного образца.

#### Выводы

Испытания лабораторной модели показали важность эффективного предварительного подогрева распыляемой воды для повышения производительности агрегата при приемлемых для установки в скважине размерах. Так, увеличение температуры впрыскиваемой воды на 50°С увеличивало производительность опытной установки в 1,6 раза. Отсюда следует, что для удовлетворения требований к компактности мощного промышленного агрегата, канал предварительного подогрева воды должен иметь значительную протяженность. В то же время, изменение положения устройства впрыска в канале течения газов не оказывает существенного влияния на процесс формирования газопаровой смеси.

#### Список литературы

1. Щепалов А.А. Тяжелые нефти, газовые гидраты и другие перспективные источники углеводородного сырья. Учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. 93 с.
2. ТЭК России — 2015. Аналитический сборник. М.: Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2016. 64 с.
3. Максудов Р.А., Орлов Г.И., Осипов А.В. Освоение запасов высоковязких нефтей в России // Технологии ТЭК. 2005. № 6. С. 36–40.
4. Макаров А.Ф., Некрасов В.Г. Альтернативный, возобновляемый, экологически чистый энергоноситель на азотоводородной основе. Научно-технические и социально-экономические аспекты использования возобновляемой энергетики. Международная научно-практическая конференция (IV), тезисы докладов. Алматы, 2008. С. 56–59.
5. Патент СССР №899872. Забойный парогазогенератор. МПК Е 21 В 43/24. Заявл. 05.05. 80. Оpubл. 23.01.82.
6. Паж Д.Г., Галузов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984. 147 с.
7. Патент РФ №2396485. Парогенератор МПК F22В 1/26. Заявл. 03.03.09. Оpubл. 10.08.10.

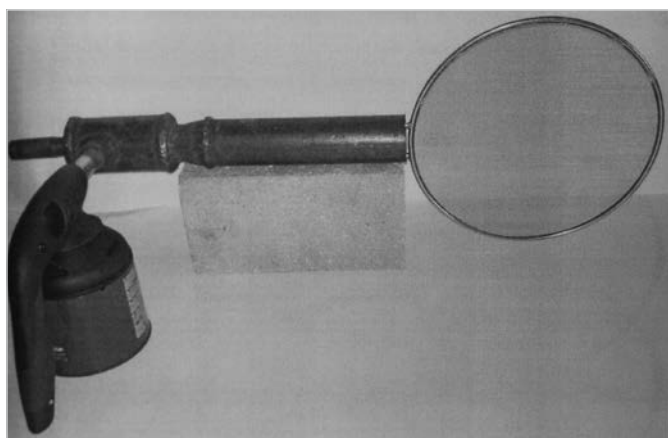


Рис. 2 — Лабораторная модель установки

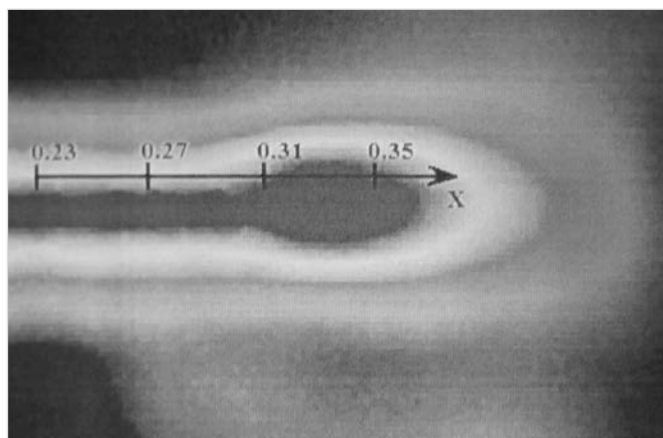


Рис. 3 — Инфракрасный снимок опыта I серии



## Downhole heat generator for high-viscosity oil and natural bitumen fields

### Authors:

**Anatoly Yu. Shchyolokov** — Sc.D., professor, head of the department; [pt@samgtu.ru](mailto:pt@samgtu.ru)

**Semyon Yu. Korotin** — postgraduate; [arro116@mail.ru](mailto:arro116@mail.ru)

Samara State Technical University ("SSTU"), Samara, Russian Federation

### Abstract

The article is devoted to some problems and possible ways of their solutions, necessary for designing a downhole heat generator (that uses associated or natural gas) for gas turbine treatment of reservoirs oil viscosity and solid bitumen.

### Materials and methods

Studies of experience in heavy oil development. The identification of characteristics of vapor-gas reshaping in the downhole heat generator. A laboratory model test.

### Results

The model of the downhole heat generator,

working on gas (associated or natural gas) and meeting the requirements of energy efficiency and passive safety, is proposed. The methodology of operational process calculation and geometrical parameters determination of pilot-plant equipment, confirmed with the results of laboratory model test, is developed. Currently the pilot-plant equipment model of the downhole heat generator, based upon experimental data, received after laboratory model tests, is being developed.

### Conclusions

Laboratory model tests showed the importance of effective preliminary heating of spray water,

to improve unit capacity, when sizes fit to well standing. Thus, rising the temperature of spray water to 50°C, increased the performance of pilot-plant equipment in 1.6 times. Consequently, meeting the requirements of high-powered industrial unit portability, the channel of pre-heated water must have sufficient length. At the same time, position changes of the injection device in gas flow channel has no significant influence on the formation of gas-vapor mixture.

### Keywords

downhole heat generator, high-viscosity oil, gas-vapor mixture

### References

- Shchepalov A.A. *Tyazhelye nefti, gazovye gidraty i drugie perspektivnye istochniki uglevodorodnogo syr'ya* [Heavy oil, gas hydrates and other prospective sources of hydrocarbon raw materials]. Nizhny Novgorod: UNN, 2012, 93 p.
- TEK Rossii — 2015 [The FEC of Russia — 2015]. Moscow: Analytical digest. Analytical Center for the Government of the Russian Federation, 2016, 64 p.
- Maksutov R.A., Orlov G.I., Osipov A.V. *Osvoenie zapasov vysokovjazkih neftej v Rossii* [The development of heavy oil reservoirs in Russia]. *Tekhnologii TEK*, 2005, issue 6, pp. 36–40.
- Makarov A.F., Nekrasov V.G. *Al'ternativnyy, vozobnovlyаемый, ekologicheski chistyy energonositel' na azotovodorodnoy osnove. Nauchno-tekhnicheskie i sotsial'no-ekonomicheskie aspekty ispol'zovaniya vozobnovlyаемой energetiki* [The alternative, renewable, environmentally friendly nitric-based energy source]. International scientific-practical conference (IV). Almaty, 2008, pp. 56–59.
- Patent SSSR №899872. *Zaboynyy parogazogenerator* [Downhole heat generator]. MPK E 21 V 43/24. Declared 05.05.80. Published 23.01.82.
- Pazhi D.G., Galustov V.S. *Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkostey* [Fundamentals of engineering spraying liquids]. Moscow: *Khimiya*, 1984, 147 p.
- Patent RF №2396485. *Parogenerator* [Heat generator]. MPK F22B 1/26. Declared 03.03.09. Published 10.08.10



ЦЕНТР  
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ

НА РЫНКЕ С 2009 ГОДА

СНИЖЕНИЕ  
ОБВОДНЕННОСТИ

ОЧИСТКА  
ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ

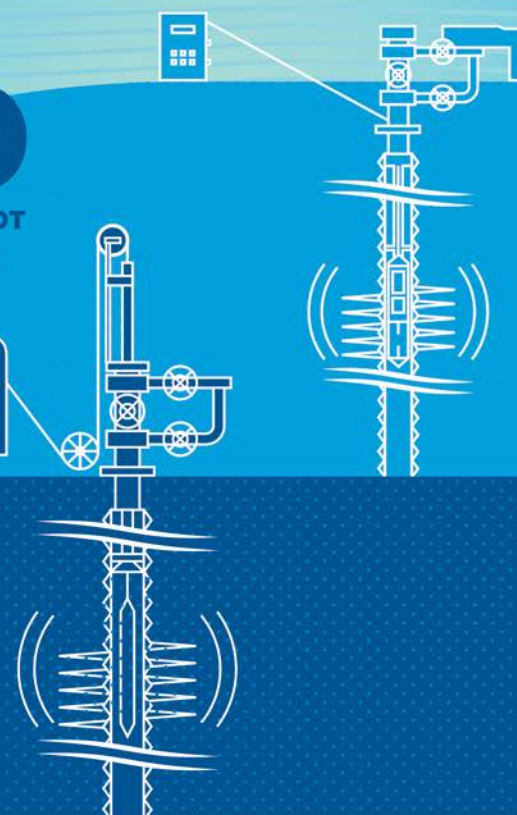
СНИЖЕНИЕ  
ВЯЗКОСТИ

ПОВЫШЕНИЕ  
НЕФТЕОТДАЧИ

Более

200

успешных работ  
в России, США  
и Канаде



[www.cut-service.ru](http://www.cut-service.ru)  
[sales@cut-service.ru](mailto:sales@cut-service.ru)  
+7 495 937 6140  
+7 495 920 7426

Наш стенд  
на Нефтегазе  
№ 22В10  
Павильон № 2 зал 2